

Budownictwo i Architektura 9 (2011) 69-76

Właściwości wytrzymałościowe betonów wysokowartościowych z kruszywem węglanowym

Jacek Góra

*Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: j.gora@pollub.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań własnych dotyczących właściwości wytrzymałościowych betonów wysokowartościowych z trzech kruszyw grubych (bazaltowego, granitowego i węglanowego). Wszystkie wyniki poddano analizie statystycznej. Istotnie wyższą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu stwierdzono w przypadku betonu wysokowartościowego z kruszywem dolomitowym w porównaniu do wytrzymałości betonów z kruszywem bazaltowym oraz granitowym. W przypadku wytrzymałości BWW na ściskanie odnotowano korzystniejszy wpływ kruszywa węglanowego niż granitowego.

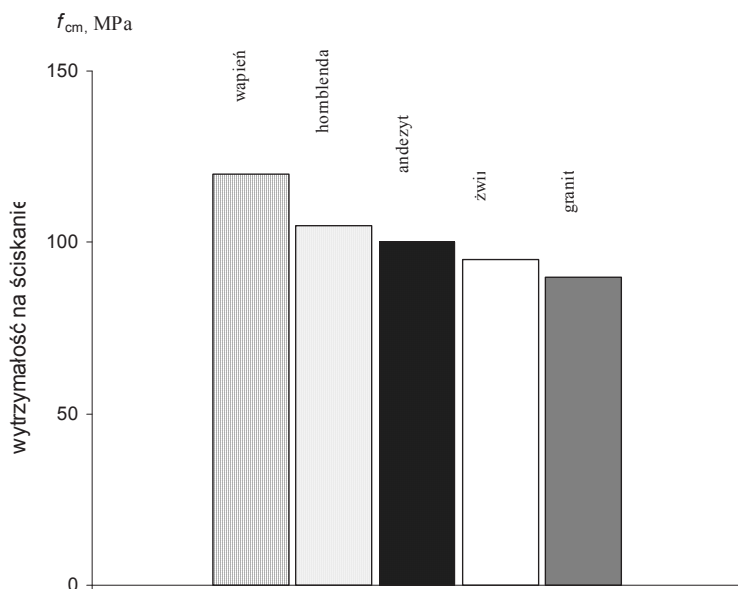
Słowa kluczowe: beton wysokowartościowy, kruszywo łamane węglanowe, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie, jednoczynnikowa analiza wariancji, test NIR.

1. Wprowadzenie

W inżynierskiej praktyce budownictwa betonowego, szczególnie w Polsce, odczuwalny jest ogólny brak zaufania do kruszyw węglanowych. Powszechnie do betonów konstrukcyjnych wysokiej wytrzymałości stosuje się kruszywa ze skał pochodzenia wulkanicznego, głównie bazaltowe i granitowe. Wynika to między innymi z ogólnie znanej małej twardości i dużej ścieralności skał węglanowych (eliminującej je niestety ze stosowania do nawierzchni drogowych), a także z dużej zmienności właściwości fizycznych pomiędzy złożami. Należy jednak podkreślić, że w dość licznych złożach występują skały węglanowe o porowatości mniejszej niż 3%, a ich właściwości wytrzymałościowe są porównywalne ze skałami granitowymi. Z kolei obawy przed negatywnymi skutkami reakcji dedolomityzacji są nieuzasadnione, gdyż głównie występuje ona, przy dużej nasiąkliwości skały zawierającej minerały ilaste w ilości powyżej 2% oraz dużej zawartości sodu i potasu w cemencie. Chcąc uniknąć w betonie szkodliwych oddziaływań chemicznych pomiędzy kruszywem a alkaliowymi znajdującymi się w cemencie należy zarówno skałę w złożu jak i otrzymane z niej kruszywo badać pod kątem oceny wrażliwości obydwu materiałów na tego typu reakcje [1,2,3]. Z szerokich badań ekspansji alkalicznej polskich skał węglanowych z 25 rozpoznanych złóż wynika, że są one niereaktywne lub słabo reaktywne i odporne na działanie alkaliów. Wyjątek stanowią dwa złoża dolomitów (Zachełmie i Korzecko) i dwa wapieni porowatych (Karsy i Trawniki) o zawartości krzemionki przekraczającej 20% [4]. Dodatkowo zagrożenie to można wyeliminować, stosując cementy niskoalkaliczne ($\text{Na}_2\text{O}_e < 0,6\%$), kruszywo o małej

porowatości (mniejszej niż 3%), superplastyfikatory lignosulfonianowe i zachowując szczelną strukturę betonu (przykładowo wartość $w/c < 0,45$).

Warto podkreślić, że fizyko-chemiczne wzajemne oddziaływanie węgla wapniowego i zaczynu cementowego przynosi korzystne zmiany w strefie kontaktowej, m.in. powstawanie monokarboglinianu, większa dezorientacja kryształów portlandytu w porównaniu do innych kruszyw, zmniejszanie porowatości i wielkości porów, wzrost wytrzymałości warstwy [5,6]. Zewnętrzny efekt jest w większości przypadków łatwo zauważalny na podstawie większych wartości wytrzymałości i modułu sprężystości betonu. Jednak ze względu na wytrzymałość skał węglanowych, zwykle niższą niż bazaltu, andezytu, czy kwarcytu, kruszywa węglanowe są niezbyt chętnie stosowane do wytwarzania betonów wysokowartościowych pomimo, że stwarzają one możliwość uzyskania betonów o wytrzymałości na ściskanie f_{cm} wynoszącej nawet 120 MPa [7] (Rys. 1).



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie betonów wysokowartościowych z różnymi kruszywami [7].
Fig. 1. Compressive strength of high performance concretes with various aggregates [7].

2. Badania własne

Badania własne przeprowadzono w zakresie betonów o stałej wartości $w/c = 0,28$ z zastosowaniem łamanego kruszywa grubego dolomitowego (Laskowa), oraz celem porównania granitowego (Graniczna) i bazaltowego (Gracze). Zastosowano cement CEM I 42,5 HSR NA oraz domieszkę upłynniającą w postaci lignosulfonianu z dodatkiem kondensatu melaminowo-formaldehydowego. W porównywanych betonach przyjęto zasadę zachowania tej samej objętości kruszywa grubego. Wskaźnik stopnia ciekłości mieszanek mieścił się w granicach od 7 do 12 cm według metody stożka opadowego, co odpowiada tradycyjnej konsystencji półcieklej oraz klasom konsystencji S2/S3 zgodnie z PN-EN 206-1:2003 [8]. Zawartość powietrza w mieszankach betonowych określona metodą ciśnieniową wynosiła: BWB-B – 1,2%, BWB-D – 1,2%, BWB-GR – 1,4%. W odniesieniu do badanych betonów określono wytrzymałość na

ściskanie (f_c) oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu ($f_{ct,sp}$). W badaniach stosowano próbki walcowe o średnicy podstawy 150 mm i wysokości 300 mm. Równoległości powierzchni ściskanych uzyskano poprzez szlifowanie. Wiek betonów w chwili badania wynosił 28 dni.

W celu uwypatnienia wpływu kruszywa na rozpatrywane właściwości betonów, zrezygnowano w badanych betonach z dodatku pyłów krzemionkowych, zazwyczaj stosowanego w betonach wysokowartościowych. Skład badanych betonów zamieszczono w Tabeli 1.

Tabela 1. Skład mieszanek betonów wysokowartościowych BWW.

Table 1. Compositions of high performance concrete mixes BWW.

składniki betonów		oznaczenie betonu (rodzaj kruszywa grubego)		
		BWW-B (bazalt)	BWW-D (dolomit)	BWW-GR (granit)
$(w + w_{sp})/c = 0,28$				
cement	[kg/m ³]	479	479	479
piasek 0÷2 mm	[kg/m ³]	699	699	699
kruszywo grube 2÷4 mm	[kg/m ³]	136	125	117
kruszywo grube 4÷8 mm	[kg/m ³]	408	376	356
kruszywo grube 8÷16 mm	[kg/m ³]	817	752	703
woda	[dm ³ /m ³]	128	128	128
superplastyfikator 2% m.c.	[kg/m ³]	9,6	9,6	9,6

3. Analiza wyników badań

Wyniki badań wytrzymałościowych przedstawiono w Tabelach 2 i 3 oraz zilustrowano graficznie na Rys. 2. Wszystkie wyniki badań poddano porównawczej analizie statystycznej – analizie wariancji oraz testowi najmniejszej istotnej różnicy (NIR) przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ [9]. Jeżeli wartość p nie przekracza założonej w analizie wartości poziomu istotności α , to różnice pomiędzy parami średnich należy traktować jako statystycznie istotne (wartości te w tablicach zaznaczono pogrubioną czcionką).

Tabela 2. Wytrzymałość średnia na ściskanie, współczynnik zmienności v oraz wyniki testu NIR betonów o $w/c = 0,28$.

Table 2. Mean compressive strength, coefficient of variation v and LSD test's results of $w/c = 0,28$ concretes.

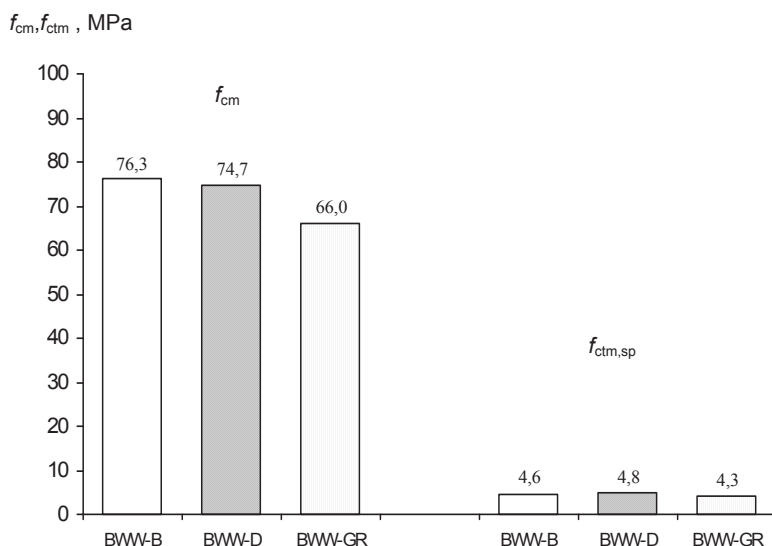
		oznaczenie betonu		
		BWW - B	BWW - D	BWW - GR
wytrzymałość na ściskanie	$f_{cm,cyl}$ [MPa]	76,3	74,7	66,0
	v [%]	5,9	7,5	6,8
klasa betonu		C70/85	C70/85	C60/75
wyniki p testu NIR dla wytrzymałości na ściskanie betonów BWW				
BWW - B		–	0,5828	0,0024
BWW - D		0,5828	–	0,0076
BWW - GR		0,0024	0,0076	–

Tabela 3. Wytrzymałość średnia na rozciąganie przy rozłupywaniu, współczynnik zmienności v oraz wyniki testu NIR betonów o $w/c = 0,28$.

Table 3. Mean splitting tensile strength, coefficient of variation v and LSD test's results of $w/c = 0,28$ concretes.

		oznaczenie betonu		
		BWW - B	BWW - D	BWW - GR
wytrzymałość na rozciąganie	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	4,60	4,80	4,25
	v [%]	5,9	6,3	4,5
wyniki p testu NIR dla wytrzymałości na rozciąganie betonów BWW				
BWW - B		–	0,2416	0,0248
BWW - D		0,2416	–	0,0021
BWW - GR		0,0248	0,0021	–

Wartości wytrzymałości na ściskanie wszystkich betonów o $w/c = 0,28$ są zgodne z wymaganiem dotyczącym betonów wysokowartościowych, czyli charakterystyczną wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach wynoszącą co najmniej 60 MPa. Warto podkreślić, że osiągnięcie wytrzymałości na ściskanie odpowiadającej betonom typu BWW, okazało się łatwiejsze przy użyciu kruszywa węglanowego o niskiej porowatości (dolomit zbity), niż w przypadku stosowania kruszywa granitowego. Według PN-EN 206-1:2003 [8] na podstawie wartości $f_{c, cyl}$ betony BWW-B oraz BWW-D spełniają wymagania dotyczące klasy C70/85, a BWW-GR klasy niższej C60/75.



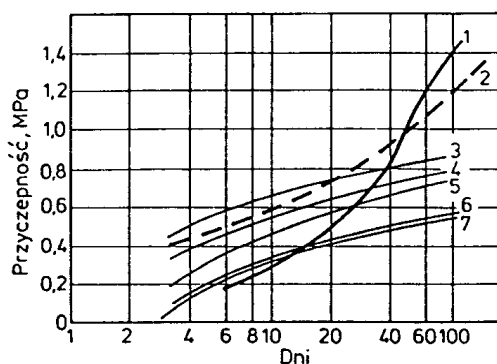
Rys. 2. Średnie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu betonów wysokowartościowych po 28 dniach twardnienia.

Fig. 2. Mean compressive and splitting tensile strength of high performance concretes after 28 days of hardening.

Przeprowadzone dwie (oddzielne) analizy wariancji ujawniły statystycznie istotny wpływ kruszywa grubego na wytrzymałość na ściskanie oraz rozciąganie badanych betonów. Wśród analizowanych wytrzymałości wykazano, że w obu

przypadkach, wartości f_{cm} i $f_{ctm, sp}$ betonu z kruszywa granitowego są istotnie mniejsze od wytrzymałości betonu z kruszywa dolomitowego i bazaltowego. Natomiast obie średnie wytrzymałości (na ściskanie i rozciąganie), analizując każdą z tych właściwości oddzielnie, betonów BWW z kruszywem bazaltowym i dolomitowym nie różnią się istotnie przy $\alpha = 0,05$ (Tabele 2 i 3).

Jednoznacznie statystycznie niższa wytrzymałość betonu BWW-GR jest niewątpliwie związana z odmiennym składem mineralnym i właściwościami skały (struktura gruboziarnista), a także kruszywa (2 i 4-krotnie wyższy wskaźnik rozkruszenia granitu niż odpowiednio dolomitu i bazaltu). Należy zaznaczyć, że w analogicznych badaniach własnych dotyczących betonów zwykłych o $w/c=0,45$ (uzyskano następujące wartości $f_{cm, cyl}$: BZ-B – 51,7 MPa, BZ-D – 51,1 MPa, BZ-GR – 54,2 MPa), beton z kruszywem granitowym charakteryzował się nieco wyższą wytrzymałością na ściskanie od pozostałych betonów, a różnice pomiędzy wytrzymałościami średnimi były statystycznie nieistotne. Świadczy to o uwydatnieniu się różnic (wynikających z odmiennych właściwości kruszyw i skał) dopiero przy wyższych wartościach niszczących naprężeń ściskających w betonach BWW. Przy w/c o wartości 0,28, a więc zdecydowanie poniżej 0,40 [10], występuje zmniejszenie porowatości i grubości warstwy kontaktowej zaczyn-kruszywo. Tym samym ułatwione jest przekazywanie naprężeń pomiędzy matrycą i wypełniaczem, o czym świadczy przełam zdecydowanej większości ziaren kruszywa grubego na powierzchni pęknięcia próbek. Zatem można uznać, że przy matrycy o tym samym w/c (bez uszlachetniających dodatków mineralnych) wpływ kruszywa i wytrzymałości strefy kontaktowej ma znaczenie decydujące o wytrzymałości betonu wysokowartościowego.

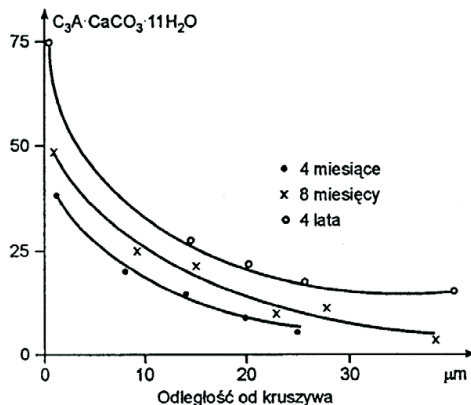


Rys. 3. Wpływ rodzaju kruszywa na przyczepność do zaczynu z cementu portlandzkiego o $w/c = 0,35$ [11]: 1 – wapień polerowany, 2 – wapień łamany, 3 – kwarc polerowany, 4 – kwarc, żwir naturalny, 5 – kalcyt polerowany, 6 – skałen polerowany, 7 – granit polerowany.

Fig. 3. The influence of aggregate type on adhesion to cement paste of $w/c = 0,35$ [11]: 1 – polished limestone, 2 – crushed limestone, 3 – polished quartzite, 4 – quartzite, gravel aggregate, 5 – polished calcite, 6 – polished feldspar, 7 – polished granite.

Zróźnicowanie w wytrzymałościach badanych betonów potwierdza między innymi wyniki badań przyczepności zaczynów o $w/c = 0,35$ (czyli poniżej 0,40) do różnych skał przedstawione przez Zimbelmanna (Rys. 3) [11], w których wśród wszystkich badanych skał najniższe wartości osiągnięto w przypadku granitu oraz skalenia. Wysokie wartości przyczepności kruszyw węglanowych do zaczynu

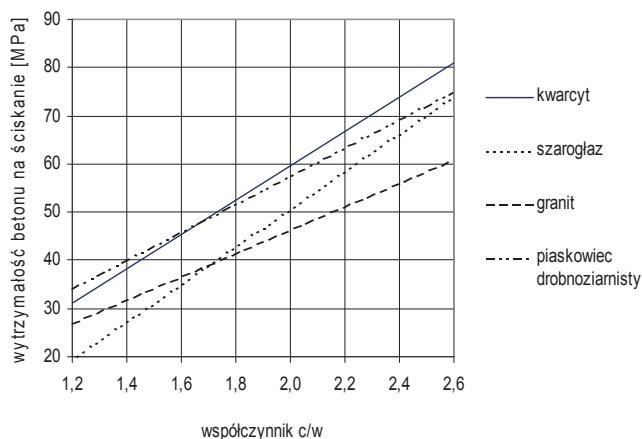
cementowego wykazane przez *Zimbelmanna* zostały potwierdzone przez *Grandeta* i *Olliviera* [12] w badaniach wpływu różnych kruszyw na zmiany składu fazowego warstwy przejściowej stwierdzone na podstawie wzrostu zawartości karboglinianu wraz ze zmniejszaniem się odległości od powierzchni ziarna kruszywa węglanowego (Rys. 4).



Rys. 4. Zawartość karboglinianu $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$ w strefie kontaktowej [12].

Fig. 4. Contents of carboaluminate $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$ in the interfacial zone [12].

Wyniki badań wpływu kruszywa i warstwy przejściowej na wytrzymałość betonów na ściskanie przedstawione przez *Alexandra* [13] (Rys. 5) również wskazują zależność, że wraz ze wzrostem wartości c/w betonów z różnymi kruszywami najniższy przyrost wytrzymałości na ściskanie odnotowano w betonach z kruszywem granitowym.



Rys. 5. Wpływ rodzaju kruszywa na wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania (wg *Alexandra* [13]).

Fig. 5. The influence of aggregate type on compressive strength of concrete after 28 days of hardening (after *Alexander* [13]).

Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu badanych betonów wskazują na zdecydowanie najkorzystniejszy wpływ kruszywa dolomitowego. Najwyższą wytrzymałością $f_{ctm,sp}$ charakteryzuje się beton BWB z kruszywem

dolomitowym, nieco niższą (o około 4%) z kruszywem bazaltowym, natomiast wyraźnie niższą (o około 11%) wartość $f_{ctm, sp}$ stwierdzono w betonie z kruszywem granitowym, a zastosowane testy wykazały statystycznie istotne różnice pomiędzy wytrzymałościami średnimi.

Korzystne wyniki wytrzymałości na rozciąganie betonów z kruszywem dolomitowym należy wiązać z potwierdzoną doświadczalnie bardzo dobrą przyczepnością zaczynu cementowego do kruszyw węglanowych, odmienną w porównaniu do pozostałych kruszyw mikrostrukturą strefy kontaktowej, a nawet jej składem fazowym [3,5,13,14,15].

W normie PN-EN 1992-1-1:2008 [16] przewiduje się przyjmowanie do obliczeń wytrzymałości średnich na rozciąganie przypisanych poszczególnym klasom betonów i określonych na podstawie wzoru $f_{ctm} = 2,12 \ln(1+0,1f_{cm})$, gdzie $f_{cm} = f_{ck} + 8$, przyjętego w przypadku klas betonów powyżej C50/60. Uzyskane w badaniach różnice pomiędzy wytrzymałościami $f_{ctm, sp}$, sięgają kilkunastu procent, a wpływ rodzaju kruszywa grubego na te wartości jest statystycznie istotny (Tabele 2 i 3). Ponadto po przeliczeniu uzyskanych wyników ($f_{ct} = 0,9f_{ct,sp}$) na wartości wytrzymałości przy osiowym rozciąganiu okazało się, że wyniki otrzymane w badaniach są od kilku do kilkunastu procent mniejsze (BW-W o 10%, BW-W-D o 6%, BW-W-GR o 13%) od wartości przyjmowanych do obliczeń według PN-EN 1992-1-1 [16]. Biorąc powyższe pod uwagę, wartość wytrzymałości na rozciąganie nie powinna być uzależniana wyłącznie od klasy betonu. Przedstawione wyniki badań własnych wskazują, że w niektórych przypadkach rzeczywiste wytrzymałości betonu na rozciąganie mogą odbiegać znacząco od wartości przyjmowanych do obliczeń.

4. Wnioski

- w pełni możliwe jest wykonanie z kruszyw węglanowych betonów wysokowartościowych bez stosowania pyłu krzemionkowego,
- statystycznie istotnie wyższą wartość wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu miał beton wysokowartościowy z kruszywa dolomitowego w porównaniu do wytrzymałości $f_{ctm, sp}$ betonów z kruszywem bazaltowym oraz granitowym, przyczyn należy się dopatrywać w korzystnym oddziaływaniu fizyko-chemicznym kruszywa węglanowego na zaczyn cementowy oraz ich wzajemnej przyczepności,
- w praktyce inżynierskiej wartość wytrzymałości na rozciąganie nie powinna być uzależniana wyłącznie od klasy wytrzymałości betonu na ściskanie, należy także uwzględnić wpływ rodzaju i składu mineralnego kruszywa potwierdzony wynikami badań.

Literatura

- [1] Hobbs D.W., *Alkali-silica reaction in concrete*, Thomas Telford Ltd., London 1988.
- [2] Hooton R.D., *Permeability and pore structure of cement pastes containing fly ash, slag and silica fume*, ASTM Symposium, Denver 1984.
- [3] Piasta J., *Badanie kruszyw węglanowych z województwa kieleckiego i ich zastosowanie do betonów konstrukcyjnych*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1971.
- [4] Piasta J., *Zachowanie się kruszyw węglanowych w betonach z cementami o różnej zawartości alkaliów*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej B-8, Kielce 1980.

- [5] Barnes B.D., Diamond S., Dilch W.L., *Micromorphology of the interfacial zone around aggregates in portland cement mortar*, Journal American Ceramic Society, Vol. 62/1979.
- [6] Maso J.C., *Interfacial transition zone in concrete*, RILEM Report 11, E & FN Spon, London 1996.
- [7] Roy D.M., Jiong W., *9th International Congress on the Chemistry of Cement*, Vol. 6, Poster Session, New Delhi 1992.
- [8] PN-EN 206-1:2003 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
- [9] Sheskin D.J., *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*, CRC Press 1997.
- [10] Kucharska L., *W/C - wskaźnik wpływu warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów zwykłych i WWB i ich podziału*, Cement-Wapno-Beton nr 2/99.
- [11] Zimbelmann R., *A contribution to the problem of cement-aggregate bond*, Cement and Concrete Research, Vol. 15/1985.
- [12] Grandet J., Ollivier J.P., *Orientation des hydrates au contact des granulates*, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris 1980.
- [13] Alexander M.G., *Fracture energies of interfaces between cement paste and rock, and application to the engineering behaviour of concrete*, Proceedings International RILEM Conference, Noordwijk, Netherlands, E & FN Spon, London 1991.
- [14] Farran J., *Contribution mineralogique a l'etude de l'adhevence entre les constituants hydrates des ciments et les materiaux associes*, Review Materials Constr. Travaux Publies, No. 490-491, 492/1956.
- [15] Roy D.M., Langton C.A., *Morphology and Microstructure of Cement Paste-Rock Interfacial Regions*, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris 1980.
- [16] PN-EN 1992-1-1:2008 *Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.

Strength properties of high-performance concretes with carbonate coarse aggregate

Jacek Góra

*Department of General Construction, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Lublin University of Technology, e-mail: j.gora@pollub.pl*

Abstract: High performance concretes were tested to find an effect of the three different coarse aggregates (basalt, granite and dolomite) on concrete strength properties. All the results were analyzed statistically. Splitting tensile strength of high performance concrete with dolomite aggregate was significantly higher than that of concretes with basalt and granite aggregate. The effect of dolomite aggregate on compressive strength of HPC was much more advantageous than that of granite aggregate.

Keywords: high performance concrete, carbonate crushed aggregate, compressive strength, tensile strength, one-way ANOVA, LSD test.